

УДК 504.064

DOI: 10.15372/ChUR2023461

EDN: TXJXVX

## Применение спутниковых данных для анализа экологического состояния нефтедобывающих территорий

Т. О. ПЕРМИТИНА, И. Г. ЯЦЕНКО

*Институт химии нефти СО РАН,  
Томск (Россия)**E-mail: pto@ipc.tsc.ru*

### Аннотация

Исследовано состояние растительного покрова шести углеводородных месторождений Парабельского района Томской области по многолетним спутниковым данным. Показан пример практического применения разработанной методики количественной оценки состояния растительного покрова нефтегазодобывающих территорий на основе значений вегетационных индексов по спутниковым данным MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Установлено, что за 12-летний период (2011–2022 гг.) изменения значений вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index) имеют положительный тренд, максимальные значения зарегистрированы в 2020 г. Это может свидетельствовать о процессе восстановления растительного покрова и улучшении экологической обстановки.

**Ключевые слова:** вегетационный период, спутниковые данные, вегетационный индекс, геоинформационные системы, растительный покров

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение характера воздействия производственных предприятий и предприятий нефтегазового комплекса на природную среду является сложной и многокомпонентной задачей, актуальность которой только возрастает. Процессы разведки, добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья служат источниками негативного влияния на окружающую среду через гидро-, лито- и атмосферу. В настоящее время разработано большое число подходов, методик и мониторинговых систем диагностики состояния природных экосистем с целью обнаружения аварийных ситуаций и оценки экологической обстановки в нефтедобывающих регионах [1]. Одно из направлений работ лаборатории «Научно-исследовательский информационный центр с музеем нефти» Института химии нефти СО РАН (Томск) связано с проведением анализа

экологического состояния природных экосистем, подверженных влиянию нефтегазодобывающих предприятий Томской области по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

Томская область – индустриальный регион с высоким уровнем промышленного, нефтегазодобывающего и нефтехимического развития. В разрезе отраслей производства Томской области основной вклад в загрязнение атмосферы приходится на выбросы предприятий топливно-энергетического комплекса, а наибольший вклад в валовый объем выбросов вносят предприятия по добыче сырой нефти и попутного нефтяного газа (ПНГ) [2].

По данным Сибирского межрегионального управления Росприроднадзора, опубликованным в 2021 г., на первом месте по выбросам загрязняющих веществ находятся предприятия нефтегазодобывающей отрасли Парабельского района

ТАБЛИЦА 1

Выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников по районам Томской области в 2011–2021 гг. [2]

Год	Масса выбросов, тыс. т		
	Каргасокский район	Парабельский район	Александровский район
2011	158.2	63.2	73.5
2012	144.0	53.0	47.1
2013	119.5	68.6	43.2
2014	89.6	94.7	34.8
2015	91.0	104.7	29.5
2016	108.6	101.7	25.5
2017	92.8	84.7	25.8
2018	82.4	73.0	20.1
2019	73.1	73.5	17.3
2020	47.9	56.6	10.4
2021	43.4	64.5	13.6

(64.5 тыс. т) Томской области [2]. Из данных табл. 1 видно, что с 2016 г. Парабельский район регулярно занимал вторые места по объему выбросов, а с 2019 г. вышел на первое место, опередив Каргасокский и Александровский районы.

Для сохранения и улучшения состояния природных экосистем, подверженных техногенному воздействию нефтегазодобывающих предприятий, необходимо регулярно проводить мониторинговые исследования и оценку состояния атмосферы, почвы, растительного покрова, поверхностных и подземных вод, что определяет актуальность и научную значимость представленных результатов.

Значительный потенциал использования спутниковых данных в задачах мониторинга растительного покрова к настоящему времени продемонстрирован результатами ряда исследований [1, 3–7]. Различия коэффициентов спектральной яркости растений и их частей обуславливаются составом и состоянием пигментов растительных и покровных тканей, морфологией растения в целом, возрастом, экологическими условиями [6, 7]. В этой связи разработка систем дистанционного зондирования Земли осуществляется с учетом возможности регистрации специфических различий отражаемой от разных объектов солнечной энергии. Выделение большего числа спектральных диапазонов съемки повышает вероятность идентификации объектов и определение их характеристик на космическом снимке. Однако значения коэффициентов спектральной яркости подвержены существен-

ным вариациям в зависимости от состояния атмосферы, времени съемки, высоты солнцестояния и других параметров. Поэтому дешифрирование и классификация типов растительности и оценка показателей их состояния по материалам космической съемки может выполняться с использованием спектральных вегетационных индексов. Вегетационные индексы представляют собой арифметические комбинации значений коэффициентов спектральной яркости в отдельных спектральных каналах спутниковых данных.

В последнее время для детектирования территорий с нарушенной растительностью и получения количественной оценки состояния растительного покрова была показана принципиальная возможность использования данных радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) со спутников Terra и Aqua [4–6].

Цель работы заключается в оценке изменения состояния растительности в зоне техногенного воздействия нефтегазодобывающих предприятий на территориях месторождений Парабельского района Томской области за 2011–2022 гг. с применением разработанной методики количественной оценки состояния растительности на основе значений вегетационных индексов спутниковых данных MODIS.

#### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория Парабельского района (рис. 1) расположена в пределах двух подзон таежной зоны Западно-Сибирской равнины [8], правобережная часть района – в пределах средней тайги, а левобережная – в южной тайге.

Проведены исследования состояния растительного покрова территории шести углеводородных месторождений Парабельского района Томской области: Герасимовское, Казанское, Калиновое, Мирное, Нижне-Табаганское и Урманское (см. рис. 1), расположенных в пределах подзоны южной тайги Западно-Сибирской равнины. Растительность здесь разнообразна, развиты березовые леса с примесью пихты, ели, кедра, кедрово-пихтовые, пихтово-елово-кедровые леса. Наиболее распространена зеленомошниковая тайга, развивающаяся на типичных подзолистых, суглинистых почвах. Березовые леса из березы бородавчатой имеют хорошо выраженный подрост хвойных пород и довольно богатый травянистый ярус [9].

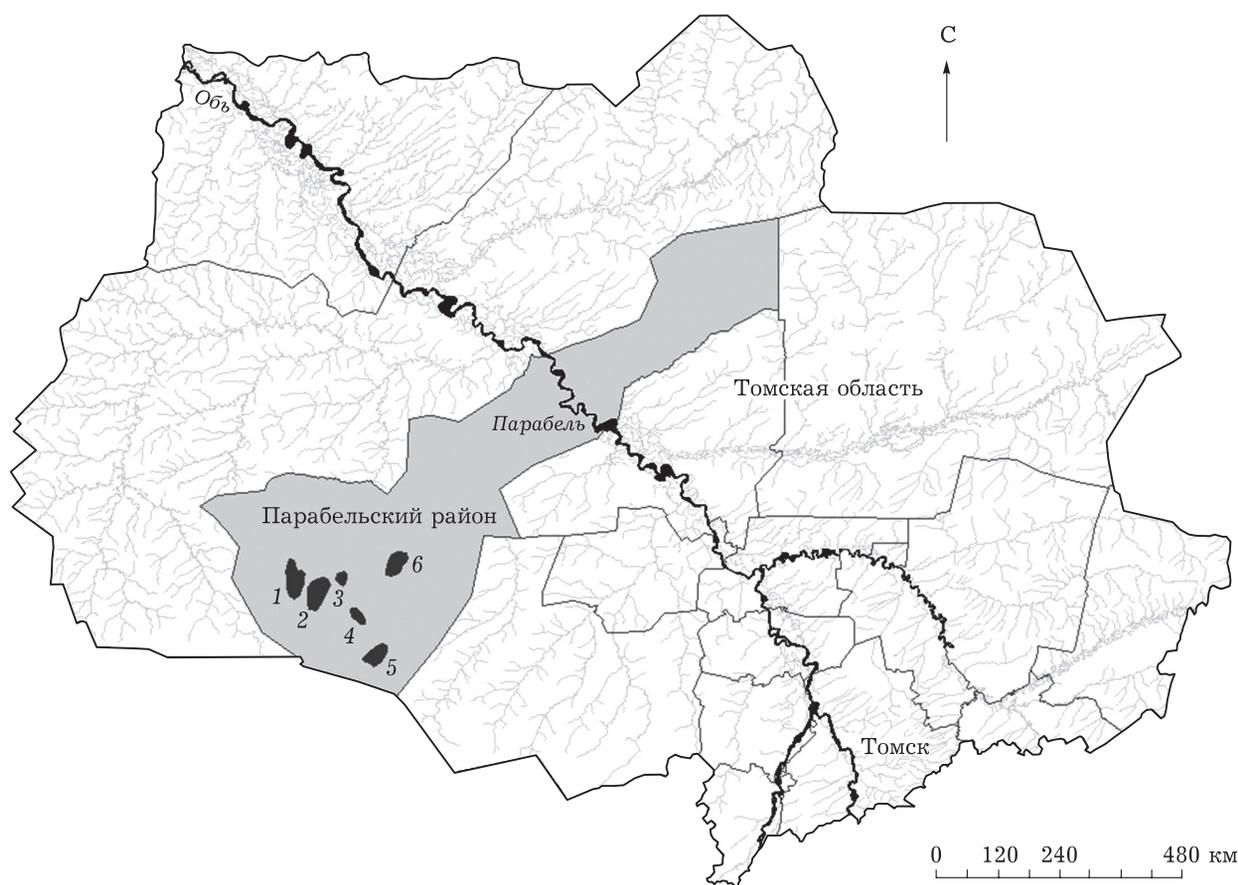


Рис. 1. Расположение исследуемых территорий углеводородных месторождений: 1 – Урманского; 2 – Нижне-Табанганского; 3 – Герасимовского; 4 – Калинового; 5 – Казанского; 6 – Мирного.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе применена разработанная ранее методика [4] оценки состояния растительного покрова по спутниковым данным MODIS – 16-дневным цифровым композитам с пространственным разрешением 250 м, содержащим значения нормированного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и усовершенствованного вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index).

Для анализа состояния растительности по данным мультиспектрального дистанционного зондирования весьма популярно использование нормированного разностного вегетационного индекса NDVI, рассчитываемого по значениям отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

где  $\rho_{nir}$  и  $\rho_{red}$  – спектральные яркости поверхности в ближнем инфракрасном и красном диапазонах соответственно.

Однако, как отмечается в работах многих авторов [5, 6], NDVI чувствителен к фоновому отражению, что ограничивает применение данного индекса. В качестве альтернативы NDVI используется усовершенствованный вегетационный индекс EVI, в расчетах которого учитываются значения спектральной яркости поверхности в синем диапазоне волн, при этом влияние почвы и атмосферы в значениях данного индекса минимизированы. Расчет вегетационного индекса EVI выполняется по формуле:

$$EVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{(\rho_{nir} + C_1)(\rho_{red} - C_2)(\rho_{blue} + L)} (1 + L) \quad (2)$$

где  $\rho_{blue}$  – спектральная яркость поверхности в синем диапазоне;  $L$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы;  $C_1$ ,  $C_2$  – коэффициенты аэрозольной устойчивости, использующие синий канал для коррекции аэрозольного влияния в красном канале. Диапазон значений индекса от  $-1$  до  $1$ ; для зеленой растительности индекс принимает значения от  $0.2$  до  $0.8$ .

Для достижения целей исследования была сформирована коллекция спутниковых данных

MOD13Q1 со значениями вегетационного индекса EVI за два 16-дневных цикла начала вегетации (май–июнь) в Томской области с 2011 по 2022 гг.: 145-й день (цикл вегетации с 25 мая по 9 июня) и следующий 161-й день (цикл вегетации с 10 по 25 июня) для каждого года.

Средствами геоинформационной системы ArcGis 10.8 проанализированы 24 цифровых карты EVI для получения количественной оценки состояния растительности шести углеродородных месторождений Томской области. Для расчета средних значений индекса EVI подготовлено шесть векторных полигональных слоев с границами исследуемых месторождений и для каждого слоя рассчитана зональная статистика – среднее, медианное значение EVI и стандартное отклонение в рамках выделенной территории для проведения сравнительного анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов средних значений вегетационного индекса EVI за два 16-дневных цикла (с 25 мая по 9 июня и с 10 по 25 июня каждого года) начала вегетации в Томской области с 2011 по 2022 гг. для территорий шести исследуемых месторождений представлены на рис. 2.

Для первого 16-дневного цикла (см. рис. 2, а) для всех территорий за 12-летний период наблюдается согласованность изменений значений индекса EVI, которая отражается в поло-

жительном тренде; максимальные значения индекса EVI месторождений (от 0.47 до 0.55) получены в 2020 г. Для второго 16-дневного цикла (см. рис. 2, б) наблюдается слабовыраженный положительный тренд, согласованность после 2020 г. не проявляется. Минимальное значение индекса EVI (0.22) наблюдаются с 25 мая по 9 июня 2013 г. для территории Казанского месторождения (см. рис. 2, а), максимальное значение индекса EVI (0.58) соответствует периоду с 10 по 25 июня 2022 г. для территории Калинового месторождения (см. рис. 2, б). В целом для всех исследуемых территорий можно отметить, что за исследуемый период изменения значений индекса EVI имеют положительный тренд и максимальные значения в большинстве случаев получены в 2020 г. Установлено, что для всех исследуемых территорий тенденции изменения индекса EVI однотипны в следующих случаях (см. рис. 2) – рост значений индекса с 2013 по 2015 гг. и в 2019–2020 гг., резкое снижение значений индекса в 2013 г.

В целях уменьшения загрязнения атмосферы Земли выбросами вредных (загрязняющих) веществ и сокращения эмиссии парниковых газов, образующихся при сжигании ПНГ, в 2012 г. Правительством Российской Федерации принято постановление № 1148 “Об особенностях исчисления платы за негативное воздействие на окружающую среду при выбросах в атмосферный воздух загрязняющих веществ, образующихся при сжигании на факельных установках и (или) рассеивании попутного нефтяного газа”,

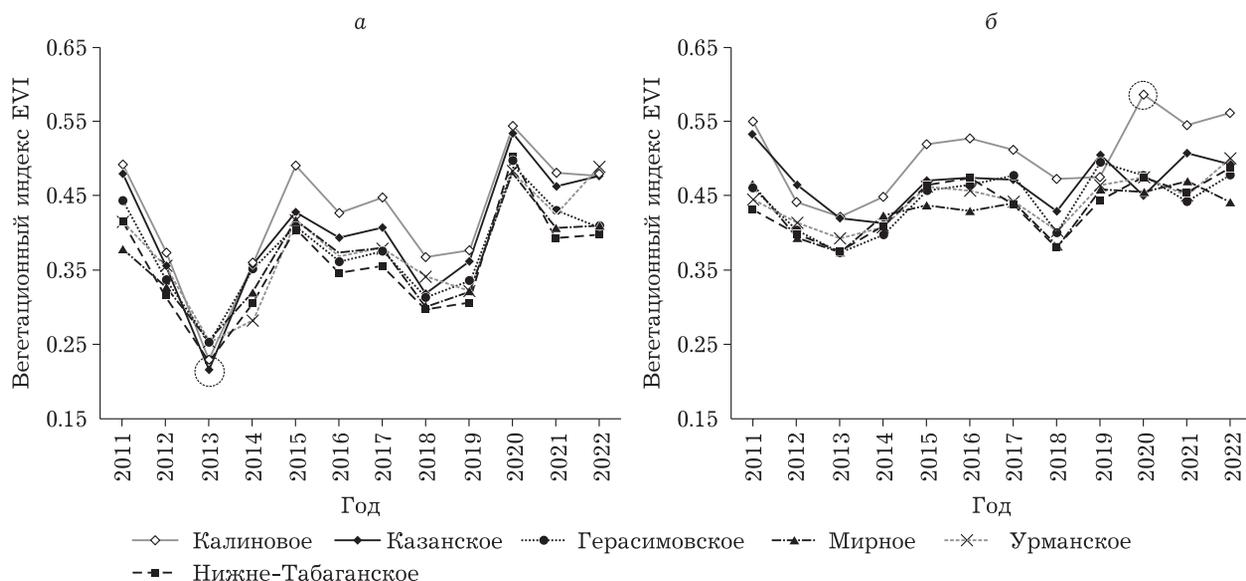


Рис. 2. Динамика изменений средних значений вегетационного индекса EVI за два 16-дневных цикла с 25 мая по 9 июня (а) и с 10 по 25 июня (б) для территорий исследованных месторождений Томской области.

что привело к снижению объемов выбросов нефтегазовыми предприятиями. Так, по данным Департамента по недропользованию и развитию нефтегазодобывающего комплекса Администрации Томской области, уровень использования ПНГ в 2020 г. составил 92.0 % [2]. Вероятно, именно это могло быть причиной роста значений индекса EVI с 2014 г. по настоящее время.

С другой стороны, соглашения стран-экспортеров нефти (ОПЕК) о снижении объемов ее добычи, принятые в апреле 2020 г. и октябре 2022 г., способствуют снижению уровня добычи нефти и в Томской области. Известно, что за последние два года добыча нефти в области сократилась на 35–40 % по сравнению с 2017 г., в 2020 г. объем нефтедобычи составил 6.3 млн. т, а в 2021 г. – 6.6 млн. т [2]. Выбросы загрязняющих веществ за этот период в целом уменьшились и значения индексов EVI с 2020 г. увеличились, что демонстрируют положительные тенденции (линейные тренды) изменения индексов (см. рис. 2). Таким образом, мировые тенденции уменьшения объемов нефтедобычи, государственная законодательная политика по сокращению выбросов в атмосферу и контроль за проведением своевременных очистительных и рекультивационных работ в целом оказывают положительный эффект при восстановлении растительного покрова за долгосрочный временной период и, следовательно, способствуют увеличению в среднем значений индекса EVI территорий рассматриваемых месторождений, что подтверждается нашими данными (см. рис. 2). Однако в среднем для 161-го дня вегетации (10–25 июня) установлено снижение значений веге-

ТАБЛИЦА 2.

Физико-химические свойства нефти Казанского и Мирного месторождений Томской области

Показатели	Месторождение	
	Казанское	Мирное
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0.7291	0.8006
Вязкость при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	0.84	1.07
Содержание, мас. %:		
парафинов	11.55	Нет данных
смол	4.91	1.20
асфальтенов	0.49	Нет данных
серы	0.24	0.07

тационного индекса EVI в сравнении со значениями 2021 г. для месторождений Мирное и Казанское (см. рис. 2, б).

Рассмотрим динамику изменения значений индекса EVI для 161-го дня вегетации (10–25 июня) для двух месторождений – Казанское и Мирное с 2011 по 2022 гг. (рис. 3). Видно, что значения EVI на территории Казанского месторождения маловариабельны, находятся в пределах 0.41–0.53, что свидетельствует о незначительном изменении состояния растительного покрова за исследуемый период. На Мирном месторождении в среднем тенденция также положительная, индекс изменяется в пределах 0.37–0.47. Отметим, что оба месторождения являются нефтегазоконденсатными, со средними запасами, открыты практически одновременно (1967–1969 гг.). Физико-химические свойства нефти этих месторождений представлены в табл. 2.

Нефти обоих месторождений легкие, маловязкие, малосернистые, с низким и средним со-

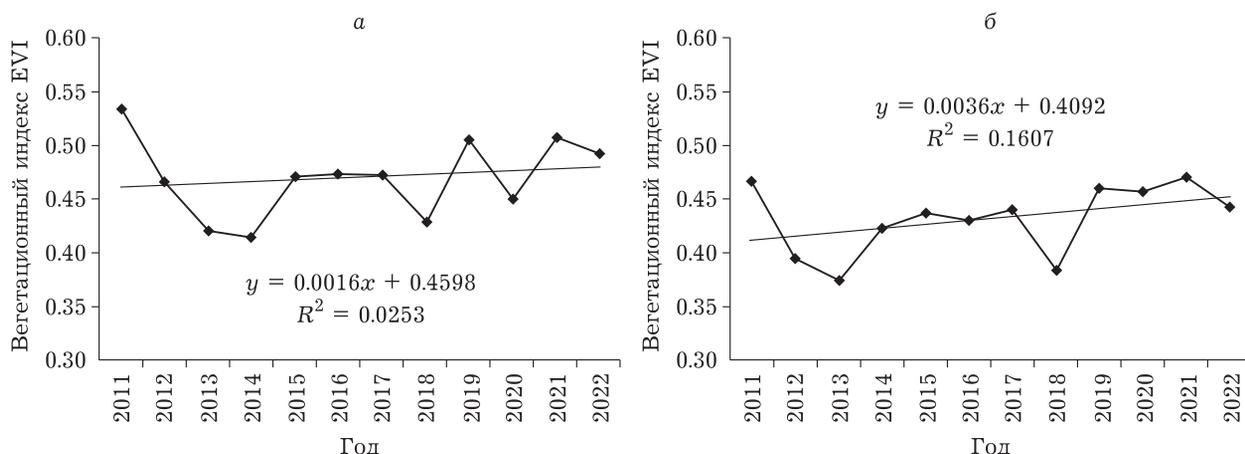


Рис. 3. Динамика изменения средних значений индекса EVI на Казанском (а) и Мирном (б) месторождениях для 161-го дня вегетации (10–25 июня).

держанием смол. Попутный нефтяной газ по составу метановый (содержание метана – 88–90 %, этана – 1.9–2.0 %, пропана – 1.4–1.6 %, бутана – 7.5–8.0 %). Можно предположить, что длительный период эксплуатации Казанского и Мирного месторождений из-за выбросов загрязняющих веществ в атмосферу оказывает постоянное и долговременное негативное влияние на состояние растительности, и поэтому не прослеживается прямой линейной связи между снижением объемов выбросов и значениями индекса EVI.

Из полученных результатов можно заключить, что территория Казанского и Мирного месторождений требует дальнейшего наиболее детального изучения с помощью космических снимков высокого пространственного разрешения для выявления факторов, вызывающих негативное влияние на растительность в границах месторождения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная ранее методика количественной оценки состояния растительного покрова нефтегазодобывающих территорий на основе значений вегетационных индексов по спутниковым данным MODIS была применена для анализа состояния растительного покрова шести углеводородных месторождений Парабельского района Томской области. Установлено, что за 12-летний период (2011–2022 гг.) изменения значений вегетационного индекса EVI имеют положительный тренд и максимальные значения в 2020 г., что может свидетельствовать о процессе восстановления растительного покрова и улучшении экологической обстановки.

Стоит отметить, что для верификации полученных данных необходимо проведение наземных исследований растительного покрова. Сочетание наземных и спутниковых данных позволит

усовершенствовать методику оценки состояния растительного покрова и расширить возможности ее применения на других территориях.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500046-7).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Терехин Э. А. Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 4. С. 111–123.
- 2 Государственные доклады “О состоянии и охране окружающей среды Томской области” [Электронный ресурс]. URL: [https://ogbu.green.tsu.ru/?page\\_id=1456](https://ogbu.green.tsu.ru/?page_id=1456) (дата обращения: 20.10.2022).
- 3 Шинкаренко С. С., Кошелева О. Ю., Гордиенко О. А., Дубачева А. А., Омаров Р. С. Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 5. С. 125–141.
- 4 Днепровская В. П., Перемитина Т. О., Ященко И. Г. Мониторинг состояния растительного покрова нефтедобывающих территорий по спутниковым данным // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 57–62.
- 5 Перемитина Т. О., Ященко И. Г. Применение многолетних спутниковых данных для оценки экологической ситуации в районе предприятий нефтегазового комплекса // Химия уст. разв. 2021. Т. 29, № 2. С. 177–181.
- 6 Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- 7 Пушкин А. А., Сидельник Н. Я., Ковалевский С. В. Оценка возможностей использования спектрального вегетационного индекса EVI для дешифрирования лесных насаждений по материалам космической съемки // Труды Белорусского гос. ун-та. 2020. № 1. С. 5–11.
- 8 Официальный сайт Парабельского района Томской области [Электронный ресурс]. URL: <https://www.parabel.tomsk.ru/content/nature> (дата обращения: 20. 10.2022).
- 9 Родной край: Очерки природы, истории, хозяйства и культуры Томской области / под ред. Б. Г. Иоганзена, И. П. Кинева. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1974. 402 с.